泛中亚干旱区气候变化特征分析

闫昕旸[1,2,3]， 张 强[1,3]， 张文波[2]， 任雪塬[1]， 王 胜[3]， 赵福年[3]
（1. 兰州大学大气科学学院，甘肃 兰州 730000；2. 甘肃省气象服务中心，甘肃 兰州 730020；
3. 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/
中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室，甘肃 兰州 730020）

摘 要：利用Climatic Research Unit（CRU）1949—2018年最新0.5°× 0.5°网格点月均数据集，主要从EOF分解、小波分析的角度，讨论了泛中亚干旱区近70 a的气候变化特征。结果表明：(1) 泛中亚干旱区近70 a降水以1.393 mm·(10a)$^{-1}$的速率呈增加趋势，夏季降水呈减少趋势，其余三季为增加趋势，其中冬季最明显[(0.834 mm·(10a)$^{-1}$]，同时冬季增温幅度也最大[0.360 ℃·(10a)$^{-1}$]；(2) 降水距平场的EOF分析表明：泛中亚干旱区降水变化趋势呈整体一致性（降水第一模态），西南–东北反向变化特征（降水第二模态），由西向东"–+–"交替分布特征（降水第三模态），3个模态都存在显著的准3 a周期，第一模态还存在5~7 a和准12 a周期，第三模态存在准7 a变化周期；(3) 温度距平场的EOF分析表明：温度距平变化表现出整体一致性（温度第一模态），东–西反向变化特征（温度第二模态），第一模态具有显著的准2 a、8~10 a周期，第二模态具有明显的2~4 a、准5 a周期。传统意义上的暖季并没有呈现出比较明显的增温多雨，冷季反而增温幅度更大，降水增加更明显。哈萨克斯坦中部、土库曼斯坦及蒙古国大部干旱化趋势明显，哈萨克斯坦东西两侧、我国新疆北部以及帕米尔高原的部分地方表现出显著的湿润化趋势，我国西北大部地区总体呈弱的湿润化趋势。随着亚洲夏季风的减弱，冷季降水增量高于暖季，这似乎说明亚洲冬季风对泛中亚干旱区降水的影响正在加大。本研究结果旨在加深对泛中亚干旱区气候变化特征的认识，为进一步防灾减灾、合理应对气候变化、坚持可持续发展战略提供科学依据。

关键词：泛中亚干旱区；EOF分解；小波分析；变化趋势

干旱区气候复杂多变，人口密集，生态脆弱，其气候变化一直是学者们研究的重点和难点[1-4]。干旱一直是最复杂而又被人们所了解最少的自然灾害，据统计，暴雨、台风、冰雹、干旱等各类气象灾害造成的经济损失占所有自然灾害的70%以上，而其中干旱就占到了50%左右[5]。在亚洲中纬度地区存在着全球纬度最高的干旱区[6]，其中，中亚干旱区包括哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦等中亚五国大部国土，中蒙干旱区包括我国西北地区大部分及蒙古中南部，2个干旱区都位于大陆腹地，远离海洋，地形多以高原、山脉、荒漠戈壁为主，主要受西风环流和季风环流影响[7]，干旱气候成因类似[8]，本文将这2个干旱区合称为泛中亚干旱区，也有学者称之为亚洲中部干旱区[9]或中东亚干旱区[10]。

前人对于泛中亚干旱区的研究，大体可归纳为两个方面：一是单独针对中亚干旱区[11-12]或中蒙干旱区[13-14]的气候变化特征进行分析[15]，然而干旱气候区并不是小范围的气候变化所能形成的，将他们分开研究，必定存在一定的局限性；另一种是将其视为一个整体，如Chen等[16]利用经验正交函数研究了亚洲中部干旱区近100 a（1901—2003年）来气温变化特征，指出区域平均增温率为0.18 ℃·(10a)$^{-1}$，冬季达到0.21 ℃·(10a)$^{-1}$，远高于全球的增温率，Hu等[17]同样用EOF对泛中亚干旱区降水做了分解，他们多是基于气象要素原始场，得到相应的变化特征。作为全球纬度最高的干旱区，其气候变化特征与其他几个干旱区有着本质的区别，对亚洲乃至全球气候变化有着不可小视的影响，在全球气候变化

收稿日期：2020-06-22； **修订日期**：2020-09-14
基金项目：国家自然科学基金项目（41630426）；干旱气象科学研究基金（IAM201913）共同资助
作者简介：闫昕旸（1990-），男，工程师，主要从事干旱气候研究. E-mail: yanxy18@lzu.edu.cn
通讯作者：张强. E-mail: zhangqiang@cma.gov.cn

背景下，泛中亚干旱区的温度和降水是否出现新的变化？区域内部是否存在空间差异及联系？这些问题目前都缺乏明确的系统性研究。本文利用Climatic Research Unit（简称CRU）1901年1月至2018年12月最新的高分辨率全球逐月格点数据集（CRU TS v.4.03），主要应用EOF分解和小波分析等方法，从要素距平场的角度，探讨了近70 a（1949—2018年）泛中亚干旱区的降水和温度变化特征，并对得到的主模态进一步做小波分析，以揭示其周期性变化，同时梳理了目前仍存在的若干问题，旨在加深对泛中亚干旱区气候变化特征的认识和把握，为进一步防灾减灾、合理应对气候变化、坚持可持续发展战略、响应国家"一带一路"倡议提供科学依据。

1 资料选取与处理方法

1.1 研究区概况

以亚洲中纬度干旱区为研究对象，包括哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦等中亚五国、蒙古以及我国西北和内蒙的大部分地区（50.75°~110.25°E，35.25°~50.75°N）。区域内气候普遍干燥少雨，大部分地区年降水量在400 mm以下（图1），帕米尔高原地区较高，沙漠地区则在50 mm以下；泛中亚干旱区地形总体东高西低，东侧以帕米尔高原、蒙古高原、天山山脉、塔克拉玛干沙漠为主，西侧包括哈萨克丘陵和以沙漠为主的图兰平原。

1.2 资料来源

本文中所用的资料来自英国East Anglia大学的Climatic Research Unit（简称CRU）1901年1月至2018年12月的高分辨率全球逐月格点数据集（CRU TS v.4.03），网格距为0.5°×0.5°。英国East Anglia大学在整合了已有的若干知名数据库的基础上，重建了一套覆盖完整且无中断的气候要素CRU数据集，重建过程中进行了严格的时间均一性检验，其资料通过观测结果直接内插，从而排除了代用资料带来的诸多不确定性[18]，IPCC第二、三次评估报告均曾采用了CRU数据集[19]，且已有大量研究表明，在我国及中亚地区，该格点资料与实测资料有很好的吻合性，因此，在年代际气候变化研究中被广泛采用[20-22]。

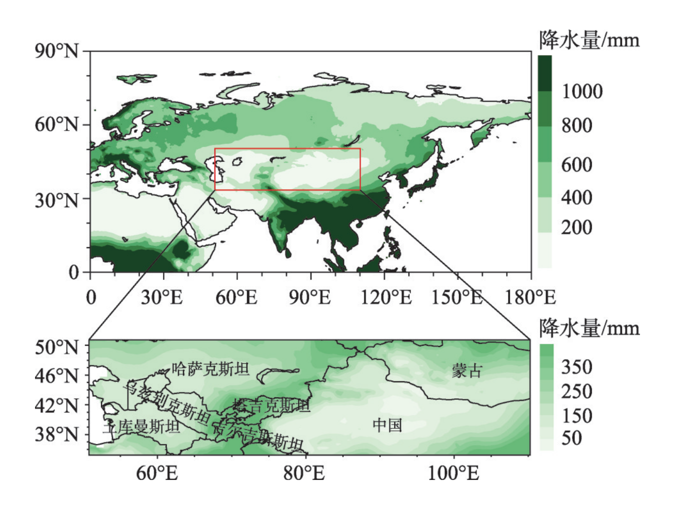


图1 泛中亚干旱区年平均降水量分布

Fig. 1 Precipitation distribution of Pan-Central-Asia arid area

1.3 研究方法

1.3.1 计算干旱指数 近年来，干旱指数（Aridity Index, AI）在干旱气候研究中广泛应用[23-24]，联合国环境规划署定义了极端干旱区（AI＜0.05）、干旱区（0.05≤AI＜0.2）、半干旱区（0.2≤AI＜0.5）和湿润偏干区（0.5≤AI＜0.65）4种类型[25]。AI具体定义如下：

$$AI = P/PET$$

式中：P为年平均降水量(mm)；PET为年潜在蒸发量(mm)。PET的计算使用Penman-Monteith公式。

1.3.2 EOF分析 经验正交函数（empirical orthogonal function，EOF）分析法是气象学研究中分析变量时空变化特征的重要方法，它能够把随时间变化的变量场分解为不随时间变化的空间函数部分以及只依赖时间变化的时间函数部分，然后用前几个主分量的空间函数和时间函数来反映变量场的主要特征。本文采用North等[26]提出的显著性检验方法来检验EOF分解出的各主分量是否是有意义的信号。为更准确把握研究区域近70 a降水和温度变化特征，本文首先计算了降水和温度的距平场，然后将距平场做EOF分解。

1.3.3 小波谱分析 小波分析可以描述信号的时间（空间）和频率（尺度）域的局部特性，解决了傅里叶变换的困难问题，成为继傅里叶变换以来在科学方法上的重大突破。采用小波分析最大优点是可对信号实施局部分析，具有发现其他信号分析方法所不能识别的、隐藏于数据之中的表现结构特性的信息[27]。

1.3.4 Mann-Kendall趋势检验法 趋势检验用到Mann-Kendall法（以下简称MK法）。MK法是一种非参数统计检验方法，不要求样本数据一定遵守某

特定概率分布，对于少数极端值也可参与趋势检验。该方法受世界气象组织推荐，广泛用于气象、水文等非正态序列的趋势检验中[28]。

2 结果分析

2.1 温度和降水的变化特征

区域平均的降水距平年际变化如图2a、图2b所示。随着全球变暖加剧，不论全球还是泛中亚干旱区，降水都具有较为显著的增加趋势。全球降水在20世纪50年代中期和70年代中前期分别有2个正距平峰值，从80年代到90年代中期一直以负距平为主，从90年代末开始，降水基本转为正距平一直持续至今。而对于泛中亚干旱区，降水距平变化则没有明显的规律，在总体呈增加趋势的基础上，正负距平交错出现，更体现了干旱区气候变化的复杂性。2个区域的温度距平变化有较强的一致性(图2c、图2d)，大体上以20世纪90年代初为节点，之前呈明显的负距平，之后呈明显的正距平。

由图3分析可知，不同地方的变化速率的趋势并不相同。我国西北地区大部、塔吉克斯坦中北部、吉尔吉斯斯坦东部以及里海、咸海之间降水量呈增加趋势(图3a)，最大值位于塔吉克斯坦西部，达到了15.716 mm·(10a)$^{-1}$，其余各地降水以负增长为主，最小值位于蒙古西部−8.745 mm·(10a)$^{-1}$；泛中亚干旱区温度均呈增加趋势(图3b)，其中，在河西走廊及青藏高原东北边坡增加较为缓慢，而蒙古西北部增速最快，最高值达到0.404 ℃·(10a)$^{-1}$；AI指数的变化(图3c)与降水量变化有较高的吻合度，降水增加趋势明显的地方，大体对应着正增长的AI指数。在哈萨克斯坦东西两侧、我国新疆北部以及帕米尔高原的部分地方表现出显著的湿润化趋势，哈萨克斯坦中部、土库曼斯坦及蒙古国大部干旱化趋势明显，我国西北大部分呈弱的湿润化趋势。

表1给出了1949—2018年全球及泛中亚干旱区降水和温度的年、季线性趋势，这里3、4、5月为春季，6、7、8月为夏季，9、10、11月为秋季，12月及次年1、2月为冬季。全球降水主要增量表现在冬季，达到了0.703 mm·(10a)$^{-1*}$(*表示通过95%的显著性检验，下同)，泛中亚干旱区冬季降水增量同样最大，达到了0.834 mm·(10a)$^{-1}$，其次是秋季的0.759 mm·(10a)$^{-1}$，春季仅为0.169 mm·(10a)$^{-1}$；2个区域夏季降水均表现为减小趋势，但都没有通过95%的显著性检验。全球春季增温最高[0.248 ℃·(10a)$^{-1*}$]，而泛中亚干旱区则是冬季增幅最大[0.360 ℃·(10a)$^{-1*}$]；冬、春季增温幅度差别不大，且普遍高于夏、秋季，其中夏季增温最缓，进一步印证了Huang等[29]指出的全球干旱半干旱区增温主要表现在冷季的结论；一年四季都是泛中亚干旱区增温大于全球，干旱区面积占全球陆地面积的35%左右[30]，却对全球变暖

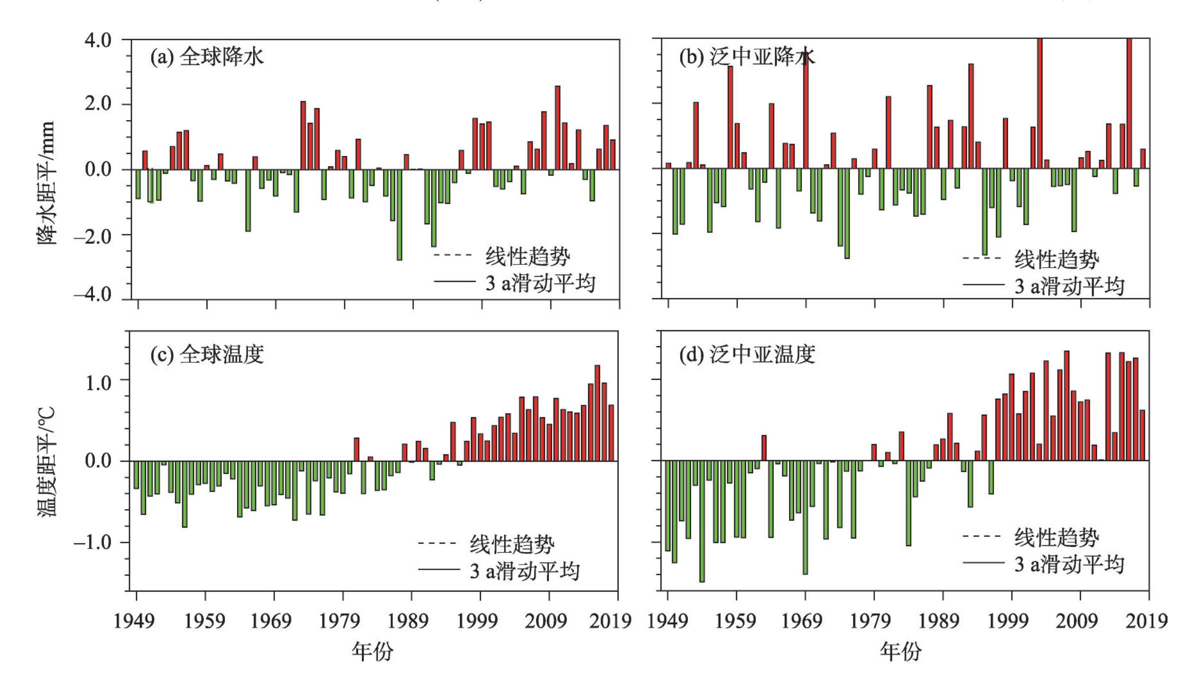
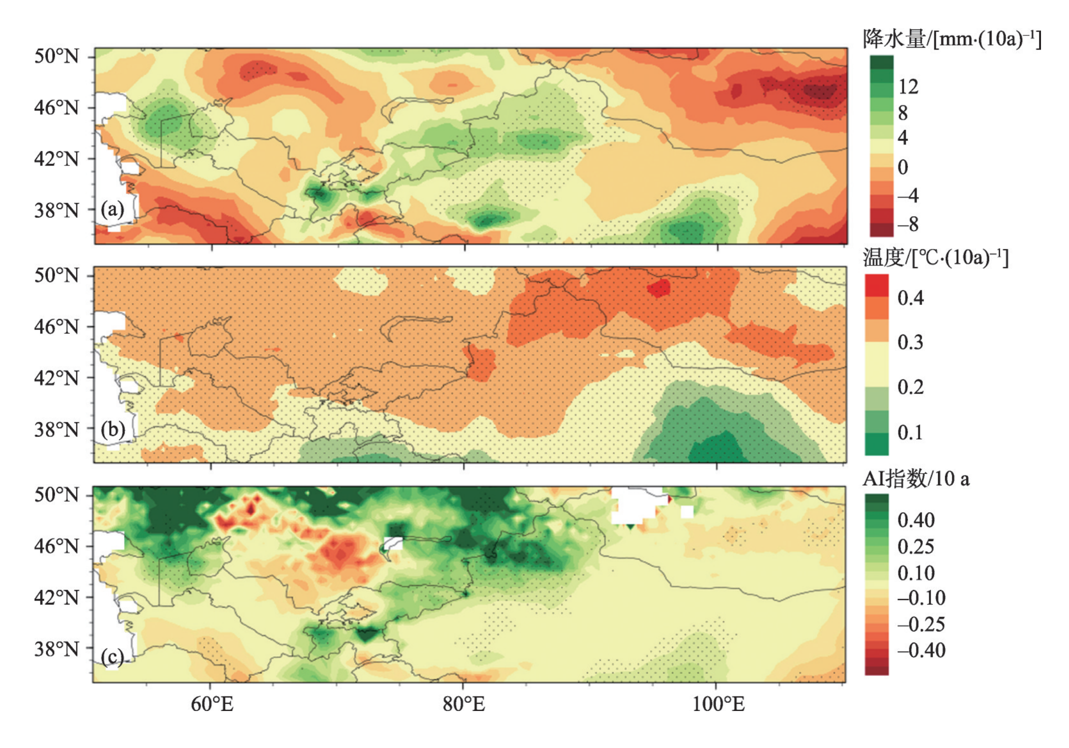


图2 1949—2018年降水(a, b)、温度(c, d)距平的年际变化

Fig. 2 Interannual variations in the precipitation anomalies (a, b) and temperature anomalies (c, d) during 1949−2018



注:阴影部分表示通过0.05的显著性检验。

图3 1949—2018年泛中亚干旱区降水(a)、温度(b)、AI(c)变化速率

Fig. 3 Change rate of precipitation (a), temperature (b), AI (c) in Pan-Central-Asia arid area during 1949−2018

表1 1949—2018年不同区域降水和温度的线性趋势

Tab. 1 Linear trend of precipitation and temperature in different regions during 1949−2018

地区	降水变化率/[mm·(10a)$^{-1}$]					温度变化率/[℃·(10a)$^{-1}$]				
	年	春季	夏季	秋季	冬季	年	春季	夏季	秋季	冬季
全球	1.225	0.514*	−0.499	0.549*	0.703*	0.215*	0.248*	0.171*	0.206*	0.239*
泛中亚	1.393	0.169	−0.633	0.759	0.834	0.304*	0.354*	0.232*	0.270*	0.360*

注:*表示通过95%的显著性检验。下同。

的贡献达到40%以上[29]。总而言之,传统意义上的暖季并没有呈现出比较明显的增温多雨,冷季反而增温幅度更大,降水增加更明显。

由表2可知,1901—2018年区域增温速率为0.142 ℃·(10a)$^{-1*}$,高于近百年来全球增温速率[31]。1901—1948年增温速率较缓[0.038 ℃·(10a)$^{-1*}$],随着工业化进程加快,地球人口急增,20世纪中叶以来,泛中亚干旱区增温速率明显加快,从1949—1978年的0.194 ℃·(10a)$^{-1*}$增至1979—1998年的0.311 ℃·(10a)$^{-1}$,但1999—2018年的温度变率相比于之前却急剧减小为0.046 ℃·(10a)$^{-1}$,与近年来的全球“增温停滞”现象[32−34]一致,虽然“增温停滞”现象明显,但降水变率却达到了8.564 mm·(10a)$^{-1}$,高于其他3个时期的降水变率,也远高于同期温度变率,但没有通过显著性检验。1901—1948年和1949—1978年,2个区降水呈现减少趋势,1979年以后趋势转为正值。从1901—1948年、1949—1978年再到1979—1998年这3个时段来看,降水并没有很大的

表2 不同时期泛中亚干旱区温度和降水的线性趋势

Tab. 2 Linear trend of precipitation and temperature in Pan-Central-Asia arid area in different periods

时期	1901—2018年	1901—1948年	1949—1978年	1979—1998年	1999—2018年
降水/[mm·(10a)$^{-1}$]	1.021*	−1.765	−1.138	0.637	8.564
温度/[℃·(10a)$^{-1}$]	0.142*	0.038	0.194*	0.311	0.046
潜在蒸发/[mm·(10a)$^{-1}$]	4.179*	2.678	9.514*	10.604	10.960

增量,但潜在蒸发却从2.678 mm·(10a)$^{-1}$剧增至10 mm·(10a)$^{-1}$左右,其中1949—1978年间通过了显著性检验[9.514 mm·(10a)$^{-1*}$],更佐证了干旱化加剧的事实。21世纪以来,随着全球变暖,降水量明显增加的同时,蒸发量也稳中有升,虽然泛中亚干旱区内部干湿变化不一(图3c),但总体干旱化趋势并未改变。

2.2 降水和温度的EOF分析

为进一步探究泛中亚干旱区降水时空变化特征,将1949—2018年区域降水距平场和温度距平场分别做EOF分解,得到特征向量场和相对应的时间序列。

降水距平场EOF分解得到的前8个模态的方差贡献率见表3,其中前3个模态通过了North等显著性检验[24],且累计方差贡献率达到47.332%,较高地估计了原变量的变化特征,从第4个模态开始减少逐渐缓慢,彼此之间差异变小,到第8个模态方差贡献率只有3.035%,因此,选取前3个模态分析研究。

从图4a来看,泛中亚干旱区降水距平变化大致表现出整体一致性,其中在吉尔吉斯斯坦附近有1个异常中心,表明该区域降水变化较其他区域更为剧烈。配合图4b来看,降水量存在明显的年际变化特征,偏多年和偏少年交织,整体波动性较强,1969年及1975年分别为降水异常最多年和最少年。

从图4c来看,泛中亚干旱区降水大体表现为西南-东北反向特征,即当蒙古西北部、我国黄土高原

表3 降水距平场前8个特征向量占总方差的百分比

Tab. 3 First-eight eigenvalues of precipitation anomalies and their contributions for the total variance

模态	1	2	3	4	5	6	7	8
方差贡献/%	28.548*	10.896*	7.888*	5.998	5.704	4.784	3.902	3.035
累计方差/%	28.548	39.444	47.332	53.330	59.034	63.818	67.720	70.755

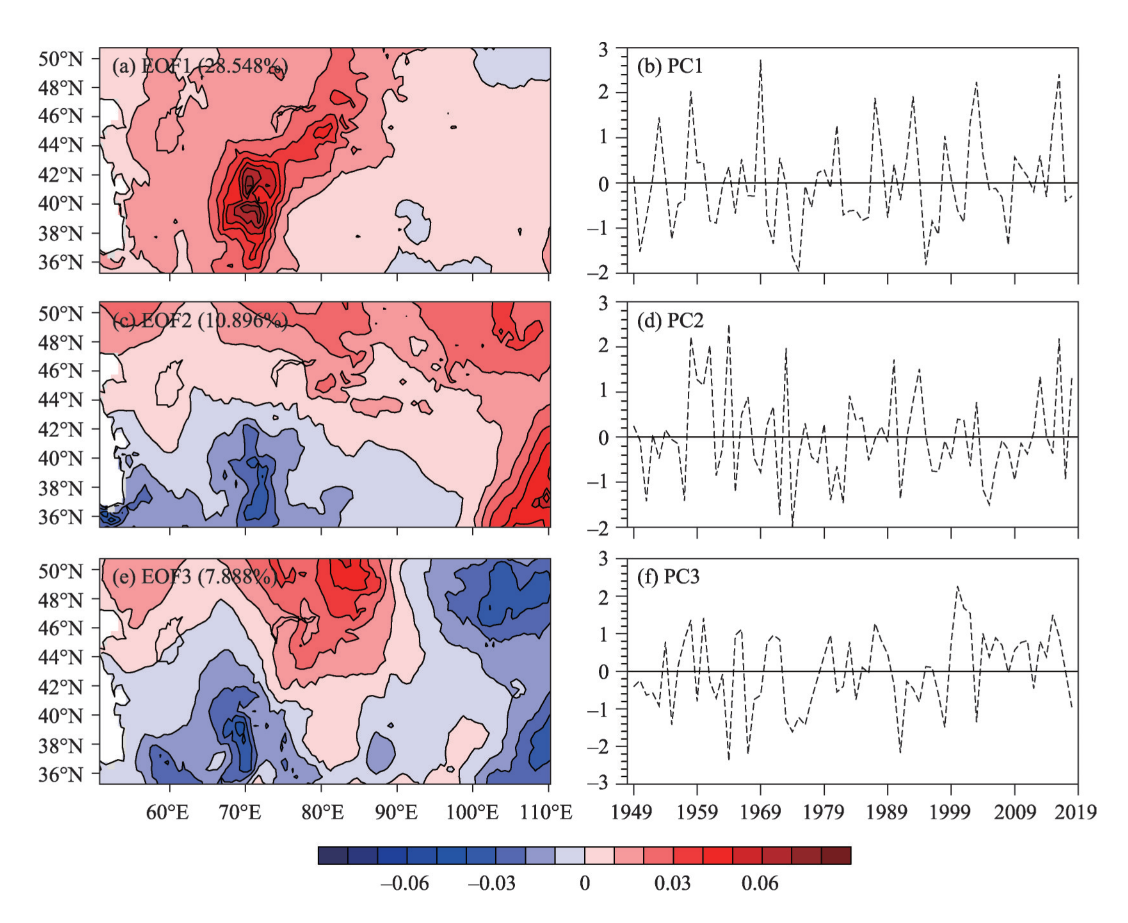


图4 1949—2018年泛中亚干旱区降水距平场EOF分解的空间模态(右)及时间系数(左)

Fig. 4 Spatial mode (right) and time series (left) of EOF for precipitation anomalies in Pan-Central-Asia arid area during 1949-2018

西部降水异常偏多时，伊朗高原北部降水异常偏少，反之亦然。配合图4d可知，伊朗高原北部地区降水在1957—1958年有1次明显的转折，之前异常偏多，之后异常偏少，一直持续到20世纪70年代初期，1974年开始又转为异常偏多并保持至80年代中期，2005—2018年间，减少趋势明显；与此同时，蒙古西北部、我国黄土高原西部降水变化规律与之正好相反。这种反向变化在1958年、1964年、1973年以及2016年最显著。

从图4e来看，从西向东表现为"-+-"交替分布型，即伊朗高原北部和蒙古中部、我国黄土高原西部降水变化相同，而与哈萨克丘陵及阿尔泰山脉西侧相反。1964年为"偏多-偏少-偏多"最显著年，2000年为"偏少-偏多-偏小"最显著年(图4f)。

温度距平场EOF分解得到的前6个模态的方差贡献率见表4，其中前4个模态通过显著性检验，但是从第3个模态开始，方差贡献值减小逐渐变缓，前2个模态累计方差贡献达到86.830%，能较高地估计原变量的变化特征，因此，选取前2个模态作为研究对象。

从图5a可知，整个泛中亚干旱区温度距平总体变化趋势一致，但存在从西北至东南逐渐减小的梯度，一定程度上说明整个区域的气温变化受某些因子共同影响，其方差贡献率远高于第二模态，可认为第一模态代表了温度变量最常见的空间分布型；注意到我国河西走廊及青藏高原东北边坡地区气温变化较其他地区更为平缓，与第1小节的结论一致。

第二模态方差贡献仅为9.170%，但同样通过了North检验，该模态反映出中亚地区与中蒙地区呈反向变化特征，其异常中心分别位于蒙古西北部高原和哈萨克斯坦西北部平原，这种反向变化特征在1983年、1972年最为明显(图5d)。

2.3 降水和温度距平场主分量的小波谱分析

为进一步揭示EOF主分量时间序列的年际周期性变化，分别将研究得到的降水距平前3个模态、温度距平前2个模态的时间序列做小波谱分析，结果如图6、图7所示。

表4 温度距平场前6个特征向量占总方差的百分比

Tab. 4 First-six eigenvalues of temperature anomalies and their contributions for the total variance

模态	1	2	3	4	5	6
方差贡献/%	77.660*	9.170*	4.676*	2.687*	1.602	0.929
累计方差/%	77.660	86.830	91.506	94.193	95.795	96.724

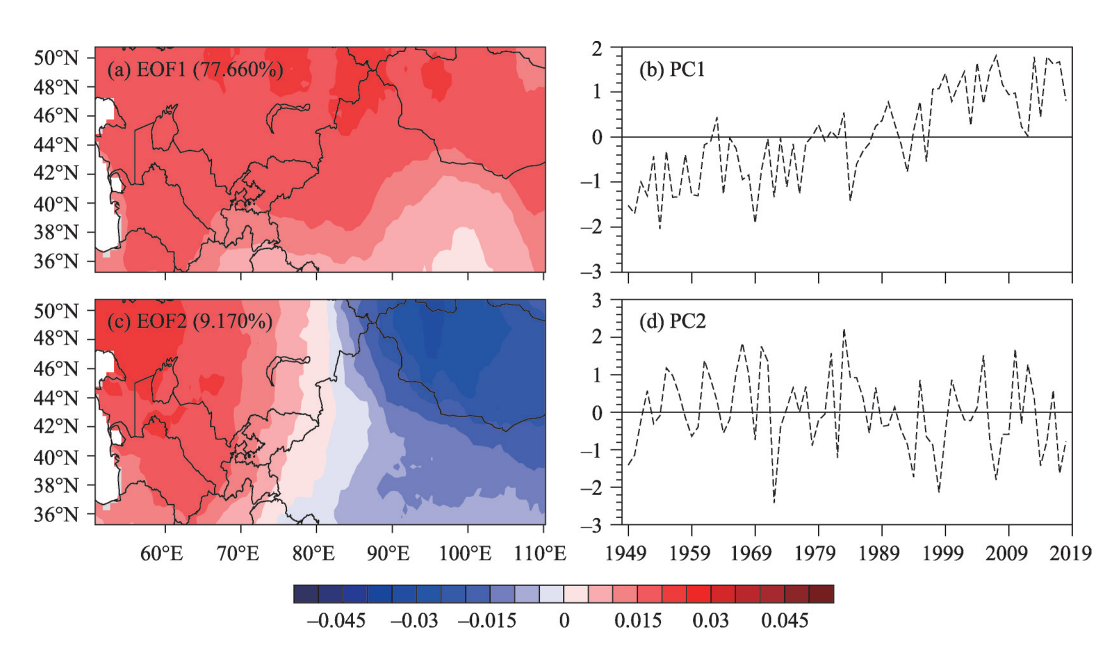
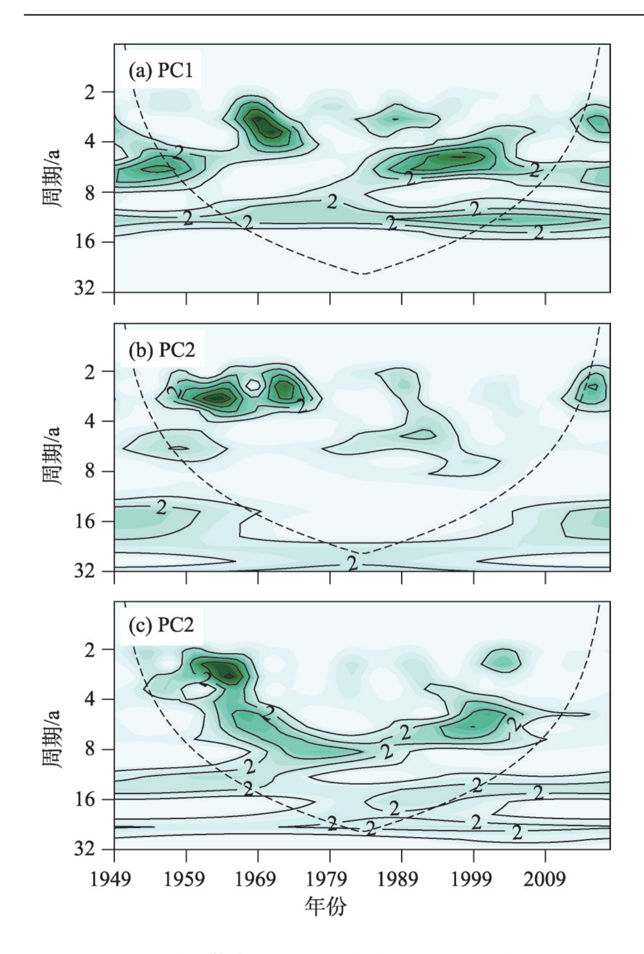


图5 1949—2018年泛中亚干旱区温度距平场EOF分解的空间模态(右)及时间系数(左)

Fig. 5 Spatial mode (right) and time series (left) of EOF for temperature anomalies in Pan-Central-Asia arid area during 1949–2018



注:虚线以上表示信度区间范围,实线所包围区域表示通过了0.05显著性水平的高斯白噪声检验的尺度周期。

图6 泛中亚干旱区降水距平场EOF分解的时间序列的小波谱分析

Fig. 6 Morlet wavelet analysis of time series of EOF for precipitation anomalies in Pan-Central-Asia arid area

泛中亚干旱区1949—2018年降水距平第一模态时间序列存在显著的准3 a、5~7 a和准12 a尺度的变化周期,其中准3 a谱在1965—1977年和1983—1994年均通过了0.05显著性水平的高斯白噪声检验(以下简称"检验"),其余时段内不显著;5~7 a谱在1985—2005年通过了检验;准12 a尺度的变化周期贯穿整个70 a,但1965年以前及2002年以后没有通过检验。第二模态时间序列存在显著的准3 a变化周期,该周期在1955—1978年、1986—1992年以及2011—2018年间最显著,但2015年之后没有通过检验。第三模态的时间序列存在显著的准3 a、准7 a的变化周期,其中准3 a周期在1954—1969年、2000—2006年间最明显,其中前者信号较强,后者信号较弱,其余时段内没有通过检验;准7 a周期从20世纪60年代一直持续到2006年,并通过检验,其余时段内并不明显。

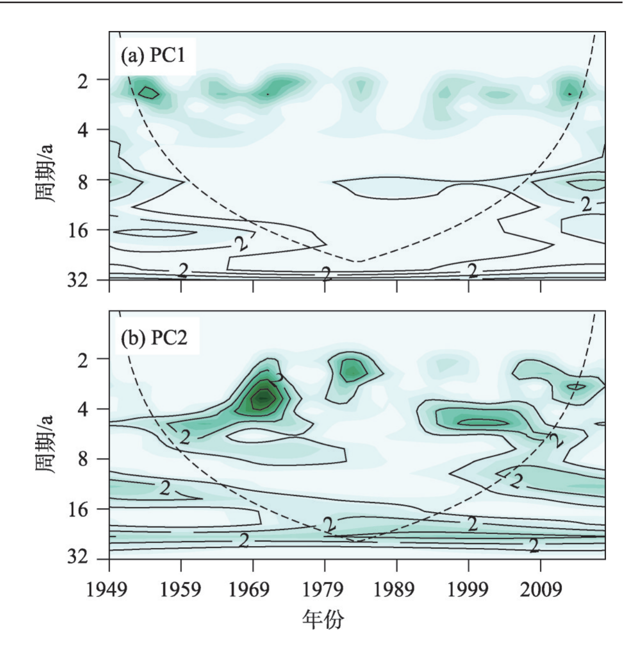


图7 泛中亚干旱区温度距平场EOF分解的时间序列的小波谱分析

Fig. 7 Morlet wavelet analysis of time series of EOF for temperature anomalies in Pan-Central-Asia arid area

泛中亚干旱区1949—2018年温度距平第一模态的时间序列存在显著的准2 a、8~10 a尺度的变化周期,其中准2 a谱只有在1952—1956年通过了检验,较显著,其余时段较弱;8~10 a尺度的变化周期从20世纪80年代一直持续到2018年,但2007年以后并没有通过检验。第二模态的时间序列表现出明显的2~4 a、准5 a变化周期,其中2~4 a谱在1967—1976年、1979—1987年间最强,并通过检验,其余时段内不明显;准5 a变化周期在1949—1977年、1992—2015年间较明显,但在2010年之后没有通过检验。

3 讨 论

研究表明,近百年来亚洲季风整体减弱[35],其中东亚夏季风的衰退[36-37],使得泛中亚干旱区东部的夏季风过渡带存在变干趋势[38],同时,与泛中亚干旱区水汽输送息息相关的南亚夏季风先增强后减弱[10],似乎进一步佐证了该区域夏季降水变率明显小于其他季节的特征(表2)。Huang等[29]研究表明,冷季是干旱区增温最显著的季节,而本文的研究也印证了这一点,同时,冷季的降水增量也较暖季更明显些,似乎说明随着夏季风的衰退,西伯利亚高压的强弱及位置所决定的亚洲冬季风对于泛

中亚干旱区降水的影响正在加大。泛中亚干旱区长期受西风环流控制[39]，而高原季风环流和亚洲季风的进退对该区域的水汽输送也尤为重要，同时青藏高原的热力作用所激发的环流扰动对大尺度Rossby波的影响直接关系到泛中亚干旱区的天气气候变化，西风环流、亚洲季风以及高原季风环流三者之间的相互作用对泛中亚干旱区所产生影响，目前仍未有明确的认识，应是未来干旱区气候变化研究中的重点。

降水对全球变暖的响应是复杂且多变的，一直是学术界的难点所在。从20世纪50年代以来，全球温度增速是逐渐增加的，同时泛中亚干旱区降水增加幅度提升（表2），波动幅度也在加大（图2），很好地响应了全球增温的大趋势；进入21世纪以来，全球出现了学术界广为认可的“增温停滞”现象，然而位于内陆深入远离海洋的泛中亚干旱区降水增加趋势并没有因此而减缓，反而出现跳跃性激增，但这种激增并没有改变当地干旱的事实，泛中亚干旱区干旱化趋势并未改变[40-41]。这种不同的响应方式的原因，值得今后深入研究。

通过EOF分解所看到的泛中亚干旱区降水西南-东北反向变化、由西向东“-+-”分布型，以及温度的东西反向变化特征，无一不体现着干旱区内部不同区域对全球气候变化响应的不同，这将是今后研究的重点。大量研究表明[42-44]，海洋是形成全球干旱区干湿变化的重要强迫源，太平洋多年代际振荡（Interdecadal Pacific Oscillation, IPO）、北大西洋涛动（North Atlantic Oscillation, NAO）等振荡信号通过引起大气环流异常而影响干旱区温度及降水的变化，这可能是引起干旱区内部不同区域对气候变化响应不同的关键因素；同时，泛中亚干旱区地域广阔，地形复杂，不但包括山脉、高原及荒漠戈壁，也包括哈萨克丘陵及里海沿岸低地，差异较大的地表反照率及不均的加热作用所产生的各种中小尺度天气系统，塔克拉玛干、卡拉库姆等几大沙漠提供源源不断的沙源所带来的沙尘气溶胶，其上风的地中海、黑海、里海以及内部的咸海[45]、巴尔喀什湖、锡尔河、伊犁河等水域的蒸发强弱变化所造成的水循环改变，以及人类活动加剧造成的碳循环变化，等等这些因素同样与泛中亚干旱区内部区域气候变化有着密切的关系。但以上种种因素孰轻孰重，能否定量表示其中的相对贡献和相互影响，造成干旱区内部降水及温度区域差异及其影响机制又是什么，都需要未来通过加强实况监测、开展数值模拟来进一步研究。

4 结 论

（1）泛中亚干旱区近70 a降水以1.393 mm·(10a)$^{-1}$的速率呈增加趋势，大于全球的1.225 mm·(10a)$^{-1}$;夏季降水表现出减少趋势，其余三季为增加趋势，其中春季最小[0.169 mm·(10a)$^{-1}$]，冬季最大[0.834 mm·(10a)$^{-1}$]；泛中亚干旱区近70 a不论一年还是四个季节的增温趋势均大于全球的增温趋势，其中冬季增温幅度最大[0.360 ℃·(10a)$^{-1*}$]。传统意义上的暖季并没有呈现出比较明显的增温多雨，冷季反而增温幅度更大，降水增加更明显。在哈萨克斯坦中部、土库曼斯坦及蒙古国大部干旱化趋势明显，哈萨克斯坦东西两侧、我国新疆北部以及帕米尔高原的部分地方表现出显著的湿润化趋势，我国西北大部地区总体呈弱的湿润化趋势。

（2）泛中亚干旱区降水距平场可分解为3种模态，一是反映全区域降水变化趋势整体一致性，但在吉尔吉斯斯坦附近降水变化较其他区域更明显的第一模态，方差贡献为28.548%，具有显著的准3 a、5~7 a和准12 a的变化周期；二是反映研究区降水西南-东北反向特征的第二模态，方差贡献为10.896%，具有显著的准3 a变化周期；三是反映研究区降水由西向东“-+-”交替分布特征的第三模态，方差贡献为7.888%，具有显著的准3 a、准7 a的变化周期。

（3）泛中亚干旱区温度距平场可分解为2种模态，一是反映研究区温度变化整体一致性，但在我国河西走廊及青藏高原边坡地区气温变化较其他地区更为平缓的第一模态，方差贡献为77.660%，具有显著的准2 a、8~10 a尺度的变化周期；二是反映研究区东西反向变化特征的第二模态，方差贡献为9.170%，具有明显的2~4 a、准5 a变化周期。

参考文献（References）：

[1] McGrath G S, Sadler R, Fleming K, et al. Tropical cyclones and the ecohydrology of Australia's recent continental-scale drought [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(3): Doi:10.1029/2011gl050263.

[2] Dai A. The influence of the inter-decadal Pacific oscillation on US precipitation during 1923–2010[J]. Climate Dynamics, 2013, 41(3-4): 633-646. Doi:10.1007/s00382-012-1446-5.

[3] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 196-213. [Zhang Qiang, Yao Yubi, Li Yaohui, et al. Research progress and prospect on the monitoring and early warning and mitigation technology of meteorological drought disaster in Northwest China [J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(2): 196-213.]

[4] 黄荣辉, 陈文, 张强, 等. 中国西北干旱区陆—气相互作用及其对东亚气候变化的影响[M]. 北京: 气象出版社, 2011. [Huang Ronghui, Chen Wen, Zhang Qiang, et al. The Air-Land Interaction over the Arid Area of Northwest China and Its Impact on East Asian Climate Change[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011.]

[5] Zhang Q, Han L, Jia J. et al. Management of drought risk under global warming [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 125(1/2): 187-196. Doi:10.1007/s00704-015-1503-1.

[6] 汤懋苍, 江灏, 柳艳香, 等. 全球各类旱区的成因分析[J]. 中国沙漠,2002, 22(1): 1-5. [Tang Maocang, Jiang Hao, Liu Yanxiang, et al. Cause analysis of arid region formation on the world [J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(1): 1-5.]

[7] Aizen E M, Aizen V B, Melack J M, et al. Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia[J]. International Journal of Climatology, 2001, 21(5): 535-556. Doi:10.1002/joc.626.

[8] 闫昕旸, 张强, 闫晓敏, 等. 全球干旱区分布特征及成因机制研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(8): 826-841. [Yan Xinyang, Zhang Qiang, Yan Xiaomin, et al. An overview of distribution characteristics and formation mechanisms in global arid areas[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(8): 826-841.]

[9] 王劲松, 陈发虎, 靳立亚, 等. 亚洲中部干旱区在20世纪两次暖期的表现[J]. 冰川冻土, 2008, 30(2): 224-233. [Wang Jinsong, Chen Fahu, Jin Liya, et al. The response to two global warming periods in the 20th century over the arid Central Asia [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(2): 224-233.]

[10] 刘玉芝, 吴楚樵, 贾瑞, 等. 大气环流对中东亚干旱半干旱区气候影响研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(9): 1141-1152. [Liu Yuzhi, Wu Chuqiao, Jia Rui, et al. An overview of the influence of atomospheric circulation on the climate in arid and semi-arid of Central and East Asia[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 48(9): 1141-1152.]

[11] 姚俊强, 刘志辉, 杨青, 等. 近130年来中亚干旱区典型流域气温变化及其影响因子[J]. 地理学报, 2014, 69(3): 291-302. [Yao Junqiang, Liu Zhihui, Yang Qing, et al. Temperature variability and its possible causes in the typical basins of the arid Central Asia in recent 130 years [J]. Acta Geographica Sinca, 2014, 69(3): 291-302.]

[12] Esper J, Shiyatov S G, Mazepa V S, et al. Temperature-sensitive Tien Shan tree ring chronologies show multi-centennial growth trends [J]. Climate Dynamics, 2003, 21(7-8): 699-706. Doi:10.1007/s00382-003-0356-y.

[13] Hu Z Z, Yang S, Wu R. Long-term climate variations in China and global warming signals[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D19): 4614. Doi:10.1029/2003jd003651.

[14] 张强, 赵映东, 张存杰, 等. 西北干旱区水循环与水资源问题[J]. 干旱气象, 2008, 26(2): 1-8. [Zhang Qiang, Zhao Yingdong, Zhang Cunjie, et al. Issues about hydrological cycle and water resource in arid region of Northwest China[J]. Arid Meteorology, 2008, 26(2): 1-8.]

[15] 徐栋, 李若麟, 王澄海. 全球变暖背景下亚非典型干旱区降水变化及其与水汽输送的关系研究[J]. 气候与环境研究, 2016, 21(6): 737-748. [Xu Dong, Li Ruolin, Wang Chenghai. Characteristics of precipitation changes and relationships with vapor transport in typical arid regions of Asia and Africa under global warming [J]. Climatic and Environmental Research, 2016, 21(6): 737-748.]

[16] Chen F, Wang J, Jin L, et al. Rapid warming in mid-latitude central Asia for the past 100 years[J]. Frontiers of Earth Science in China, 2009, 3(1): 42-50. Doi:10.1007/s11707-009-0013-9.

[17] Hu Z, Zhou Q, Chen X, et al. Variations and changes of annual precipitation in Central Asia over the last century [J]. International Journal of Climatology, 2017, 37: 157-170. Doi:10.1002/joc.4988.

[18] 张红丽, 张强, 刘骞, 等. 中国干旱状况的时空分布特征及影响因素[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2016, 52(4): 484-491. [Zhang Hongli, Zhang Qiang, Liu Qian, et al. The temporal and spatial distribution characteristics of dryness index and its main factors in China[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences Edition, 2016, 52(4): 484-491.]

[19] 王劲松, 陈发虎, 靳立亚, 等. 近100年来中东亚干旱区气候异常与海平面气压异常的关系[J]. 高原气象, 2008, 27(1): 84-95. [Wang Jinsong, Chen Fahu, Jin Liya, et al. Relationships between climatic anomaly in arid region of Centre-East Asia and sea level pressure anomaly in the last 100 years [J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(1): 84-95.]

[20] 黄秋霞, 赵勇, 何清. 基于CRU资料的中亚地区气候特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 396-403. [Huang Qiuxia, Zhao Yong, He Qing. Climatic characteristics in Central Asia based on CRU data [J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 396-403.]

[21] 杨朝虹, 张镭, 苑广辉, 等. 东亚和北美地区温度和降水变化特征[J]. 高原气象, 2018, 37(3): 662-674. [Yang Zhaohong, Zhang Lei, Yuan Guanghui, et al. Characteristics of temperature and precipitation in East Asia and North America[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(3): 662-674.]

[22] 陈发虎, 黄伟, 靳立亚, 等. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(11): 1647-1657. [Chen Fahu, Huang Wei, Jin Liya, et al. Spatiotemporal precipitation variations in the arid Central Asia in the context of global warming[J]. Science China Earth Sciences, 2011, 41(11): 1647-1657.]

[23] 钱正安, 宋敏红, 吴统文, 等. 世界干旱气候研究动态及进展综述(Ⅱ): 主要研究进展[J]. 高原气象, 2017, 36(6): 1457-1476.

[Qian Zheng'an, Song Minhong, Wu Tongwen, et al. Review of advances in world dryland climate research(Ⅱ): Main investigation progress [J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(6): 1457−1476.]

[24] 马柱国, 符淙斌, 杨庆, 等. 关于我国北方干旱化及其转折性变化[J]. 大气科学, 2018, 42(4): 951−961. [Ma Zhuguo, Fu Congbin, Yang Qing, et al. Drying trend in northern China and its shift during 1951- 2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(4): 951−961.]

[25] Hulme M. Recent climatic change in the world's drylands [J]. Geophysical Research Letters, 1996, 23(1): 61−64. Doi:10.1029/95gl03586.

[26] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. Monthly Weather Review, 1982, 110(7): 699−706. Doi:10.1175/1520−0493(1982)110<0699:seiteo>2.0.co;2.

[27] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61−78. Doi:10.1175/1520−0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2

[28] 马柱国, 符淙斌. 20世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系[J]. 中国科学: 地球科学, 2007, 37(2): 222−233. [Ma Zhuguo, Fu Congbin. Evidences of drying trend in the global during the later half of 20th century and their relationship with large-scle climate background[J]. Science China Earth Sciences, 2007, 37(2): 222−233.]

[29] Huang J, Guan X, Ji F. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12: 5391−5398.

[30] 张强, 张良, 崔显成, 等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 763−778. [Zhang Qiang, Zhang Liang, Cui Xiancheng, et al. Progresses and challenges in drought assessment and monitoring[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7): 763−778.]

[31] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 95−123.

[32] Kerr R A. What happened to global warming? scientists say just wait a bit[J]. Science, 2009, 326(5949): 28−29. Doi:10.1126/science.326_28a.

[33] Knight J, Kennedy J J, Folland C, et al. Do global temperature trends over the last decade falsify climate predictions? [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90(8): S22−S46.

[34] Medhaug I, Stolpe M B, Fischer E M, et al. Reconciling controversies about the "global warming hiatus"[J]. Nature, 2017, 545 (7652): 41−47. Doi:10.1038/nature22315.

[35] Wang B, Ding Q. Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(6). Doi:10.1029/2005gl025347.

[36] 姜大膀, 田芝平. 21世纪东亚季风变化: CMIP3和CMIP5模式预估结果[J]. 科学通报, 2013, 58(8): 707−716. [Jiang Dabang, Tian Zhiping. East Asian monsoon change for the 21st century: Results of CMIP3 and CMIP5 models[J]. China Science Bulletin, 2013, 58(8): 707−716.]

[37] 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 691−719. [Huang Ronghui, Gu Lei, Chen Jilong, et al. Recent progresses in studies of the temporal- spatial variations of the East Asian Monsoon system and their impacts on climate anomalies in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 691−719.]

[38] 张强, 岳平, 张良, 等. 夏季风过渡区的陆−气相互作用: 述评与展望[J]. 气象学报, 2019, 77(4): 758−773. [Zhang Qiang, Yue Ping, Zhang Liang, et al. Land- atmosphere interaction over the summer monsoon transition zone in China: A review and prospects [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2019, 77(4): 758−773.]

[39] 杨莲梅, 关学锋, 张迎新. 亚洲中部干旱区降水异常的大气环流特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 249−259. [Yang Lianmei, Guan Xuefeng, Zhang Yingxin. Atmospheric circulation characteristics of precipitation anomaly in arid regions in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 249−259.]

[40] 张强, 张存杰, 白虎志, 等. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响——总体暖干化, 局部出现暖湿迹象[J]. 干旱气象, 2010, 28(1): 1−7. [Zhang Qiang, Zhang Cunjie, Bai Huzhi, et al. New development of climate change in Northwest China and its impact on arid environment [J]. Journal of Arid Meteorology, 2010, 28(1): 1−7.]

[41] 张乐园, 王弋, 陈亚宁. 基于SPEI指数的中亚地区干旱时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 331−340. [Zhang Leyuan, Wang Yi, Ghen Yaning. Spatial and temporal distribution characteristics of drought in Central Asia based on SPEI index[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 331−340.]

[42] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling [J]. Nature, 2013, 501(7467): 403−407. Doi:10.1038/nature12534.

[43] Zhang R, Delworth T L. Impact of Atlantic multidecadal oscillations on India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33 (17): L17712. Doi:10.1029/2006gl026267.

[44] Huang J, Xie Y, Guan X, et al. The dynamics of the warming hiatus over the Northern Hemisphere [J]. Climate Dynamics, 2017, 48 (1/2): 429−446. Doi:10.1007/s00382−016−3085−8.

[45] 阿布都米吉提·阿布力克木, 葛拥晓, 王亚俊, 等. 咸海的过去、现在与未来[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 7−18. [Ablekim Abdimijit, Ge Yongxiao, Wang Yajun, et al. The past, present and future of the Aral Sea [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 7−18.]

Analysis of climate characteristics in the Pan-Central-Asia arid region

YAN Xinyang[1,2,3], ZHANG Qiang[1,3], ZHANG Wenbo[2], REN Xueyuan[1],
WANG Sheng[3], ZHAO Funian[3]

(1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Meteorological Service Center of Gansu Province, Lanzhou 730020, Gansu, China; 3. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province; Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: Climate change in arid areas is an important scientific issue. Based on monthly Climatic Research Unit data from 1949 to 2018, the characteristics of climate change in the Pan-Central-Asian arid region throughout the past 70 years were studied used empirical orthogonal function (EOF) and wavelet analyses. The results showed that precipitation in the Pan-Central-Asian arid area increased at the rate of 1.393 mm·$(10a)^{-1}$ in the past 70 years. Precipitation in summer showed a decreasing trend, while the other three seasons showed an increasing trend, of which winter was the most obvious [0.834 mm·$(10a)^{-1}$]. Winter also showed the largest temperature increase [0.360 °C·$(10a)^{-1}$]. EOF analysis of precipitation anomalies shows that the precipitation anomalies in the Pan-Central-Asia arid region reflected overall consistency (the first mode of precipitation), the southwest-northeast showed reverse change characteristics (the second mode of precipitation), and west to east exhibited "−+−" alternating distribution characteristics (the third mode of precipitation). There were markedly quasi 3 a periods in all three modes, and the first mode also had quasi 5−7 a and quasi 12 a periods, while the third mode also exhibited a quasi 7 a change period. The EOF analysis of temperature anomalies showed that the temperature anomalies reflected the overall consistency (the first mode of temperature), east-west showed reverse change characteristics (the second mode of temperature), and the first mode had quasi 2 a and 8−10 a periods. At the same time, there were obvious 2−4 a and quasi 5 a cycles in the second mode. The warm season did not show a more obvious increase in the temperature and rainfall, while the cold season showed a larger increase in temperature and precipitation. Some regions presented a witting trend, such as the east and west sides of Kazakhstan, northern Xinjiang in China, and parts of the Pamir Plateau, while other places like central Kazakhstan, most of Mongolia, and Northwestern China exhibited an obvious drying trend. In general, most of Northwest China is in a weak wetting trend. With the weakening of the Asian summer monsoon, the precipitation increment in the cold season is higher than that in the warm season, which seems to indicate that the influence of the Asian winter monsoon on precipitation in the Pan-Central-Asia arid area is increasing. The research results of this paper aim to deepen the understanding of the characteristics of climate change in the Pan-Central-Asia arid region, as well as provide a scientific basis for further disaster prevention and mitigation, rational response to climate change, and sustainable development strategies.

Keywords: Pan-Central-Asia arid area; EOF; wavelet analysis; changing trend